

CONTROL DE LA VELOCIDAD DE LLENADO DE LÍQUIDOS EN TANQUES USANDO FIBRAS ÓPTICAS

Carlos Galíndez⁽¹⁾, Mauro Lomer⁽¹⁾, M.A. Quintela⁽¹⁾, M.L. Amo⁽²⁾, J.M. López-Higuera⁽¹⁾.

galindez@teisa.unican.es

⁽¹⁾ Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander- España.

⁽²⁾ Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona-España

Abstract- A novel optical fiber sensor is presented. This new device could control the liquids filling speed contained into reservoirs. The sensor is based on bending losses on large diameter multimode optical fibers and lateral polishing. The sensor is made of a single optical fiber, which is rolled over a cylindrical structure of 8mm diameter, 56 stacked loops composed the sensor set. Experimental set up as well as the study and data analysis are presented.

Resumen- Se presenta un sensor nuevo de fibras ópticas capaz de controlar la velocidad de llenado de líquidos en tanques. El principio de funcionamiento del sensor esta basado en las pérdidas de curvaturas en fibras ópticas multimodo de gran diámetro y pulidas lateralmente. La cabeza sensora esta compuesta de una sola fibra en forma de espiras de 56 vueltas sobre una estructura cilíndrica de 8 mm de diámetro. El estudio y resultado experimental son presentados.

I. INTRODUCCIÓN

Numerosos sensores de fibras ópticas, intrínsecos o extrínsecos han sido propuestos en los últimos 25 años. Una gran variedad de montajes ópticos han sido realizados para las medidas físicas o químicas [1]. Los sensores de fibras ópticas presentan muchas ventajas con relación a los sensores basados en principios eléctricos o mecánicos, éstos son inmunes a las interferencias electromagnéticas y pueden ser ubicados en lugares inaccesibles o agresivos. Las fibras ópticas sirven también para realizar dispositivos y componentes de sistemas de comunicaciones ópticas. Esto es acopladores, filtros, polarizadores, redes de Bragg, etc. Un dispositivo de fibras ópticas ampliamente utilizado, es el basado en las pérdidas de curvatura [2]. Si la cubierta de la fibra es finita, influye el índice de refracción del medio exterior [3]. Además, para la detección de las pérdidas, varios tipos específicos de curvaturas han sido estudiados con la finalidad de obtener grandes rangos dinámicos de medida [4-5]. Su empleo en el diseño y construcción de sensores basados en este efecto tiene numerosas aplicaciones prácticas. Si, además de las curvaturas, se descubre el núcleo de la fibra, las pérdidas aumentan y el sistema se muestra más sensible al medio exterior.

En la industria, el control de llenado de tanques de líquidos, de diferente naturaleza, necesita de un control preciso del volumen de líquidos a fin de controlar un proceso de producción. En los motores o vehículos que utilizan combustible líquido para su funcionamiento, un control de la velocidad de consumo puede ser un dato clave para el

utilizador. Este control puede ser realizado con un sensor de fibra óptica.

En este documento presentamos la realización de un nuevo sensor capaz de controlar la velocidad de llenado de líquido en tanques utilizando fibras ópticas multimodo de gran diámetro. El sensor presentado es un sensor de intensidad basado en las pérdidas de curvatura y pérdidas de pulido del núcleo de una fibra óptica multimodo de plástico (FOP). Se presentan el estudio teórico, el dispositivo y los resultados experimentales.

II. PRINCIPIO

Cuando a una fibra óptica recta se le provocan curvaturas con relación a su eje se producen pérdidas de luz propagadas en su interior. Estas pérdidas son función del radio de curvatura y del tipo de fibra (monomodo o multimodo, a salto de índice o a gradiente de índice). En general, las pérdidas de curvaturas contienen dos términos: pérdidas de transición y pérdidas puras de curvatura [4]. En el caso de la fibra FOP, su estudio puede ser abordado con ayuda de la teoría de rayos, debido a que contienen una gran cantidad de modos propagados. Esto nos permite disponer de expresiones simples que pueden caracterizar las pérdidas de curvatura. A continuación el estudio será realizado para una fibra multimodo a salto de índice y de gran diámetro.

En las fibras multimodo, las pérdidas significativas tienden a ocurrir para un radio de curvatura crítico R_c que, puede estimarse de acuerdo a la siguiente relación [7];

$$R_c = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} \quad (1)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices del núcleo y la cubierta respectivamente y λ es longitud de onda de la luz en el vacío.

De la ecuación (1) se puede observar que las pérdidas de curvaturas se reducen cuando la diferencia relativa de índices es grande o cuando la longitud de onda de la luz disminuye. Cuando el radio de curvatura R no es demasiado cercano de R_c , las pérdidas transitorias en la entrada de la zona curvada de una fibra multimodo, debido al filtrado espacial, se expresan mediante la expresión [7]:

$$\alpha(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{R}{R - R_c} \right] \quad (2)$$

Varios métodos de cálculo para determinar las pérdidas por curvaturas han sido propuestos. Un método, basado en el trazado de rayos, ha sido desarrollado en la referencia [6]. Por ejemplo, las pérdidas totales de radiación causadas por una vuelta completa en una fibra FOP típica de salto de índice de 1 mm de diámetro en función del radio de curvatura presenta pérdidas de 4,5 dB para un radio $R=5$ mm [3], [6].

Una vez conocidas las pérdidas en una curvatura, se pueden asociar varias curvaturas dispuestas secuencialmente, y dado que, estas son constantes; a través de la relación básica de proporcionalidad física:

$$l \propto t; \quad l = vt \quad (3)$$

Se puede encontrar la velocidad de variación del nivel de un líquido en un tanque. Conociendo la proporcionalidad entre las pérdidas y la altura del nivel, así como, la dependencia entre las pérdidas y el tiempo de variación de dicho nivel se puede llegar al valor constante de v .

Con un dispositivo que contenga múltiples curvaturas en forma de espiras se dispone de pérdidas totales, pero si en cada vuelta se realiza un pulido lateral en una porción de la curvatura hasta alcanzar el núcleo, se incrementan las pérdidas totales. En este caso la sensibilidad de la curvatura con el medio exterior es más importante ya que puede detectar el cambio de aire con un líquido, por ejemplo. Si el dispositivo es dispuesto verticalmente en el fondo de un tanque vacío, y luego cuando se comienza a llenar con un líquido, cada vuelta pulida de la fibra registrara una disminución de la intensidad óptica en el extremo. Como la distancia de cada punto de paso del líquido es conocido, relacionado al incremento de las pérdidas, se toma el tiempo y finalmente se determina la velocidad.

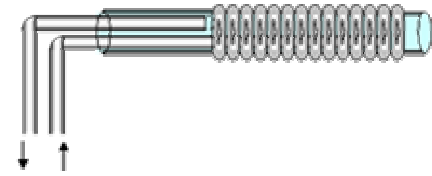
III. REALIZACIÓN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Para el presente trabajo se utilizó fibra óptica plástica sin cubierta de protección mecánica de PMMA de salto de índice y de 1mm de diámetro, con índice de núcleo y cubierta $n_1=1,492$ y $n_2=1,402$, respectivamente. Sobre una porción de una fibra FOP de 3 m de longitud, se han formado curvaturas de vuelta completa en forma de espiras tal como el mostrado en la Fig. 1. El dispositivo contiene 56 vueltas, dispuesto sobre una longitud de 6,02 cm. Sobre una superficie lateral se ha realizado el pulido, alcanzando ligeramente el núcleo formándose una superficie elíptica (Fig. 2)

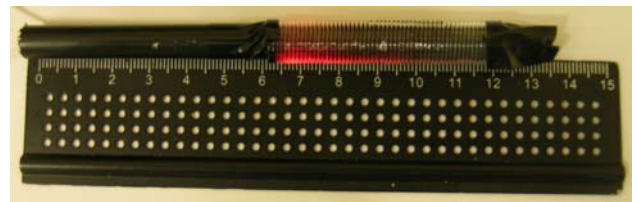
El espesor pulido ε , Fig. 2, es determinado por la relación: $\varepsilon=d^2/(2R)$ donde d es el radio del eje largo de la elipse formada por el pulido de la región curvada.

Cuando la luz se propaga a través de la fibra, se produce una atenuación en el extremo de la fibra, por efecto de la curvatura y el pulido. Si el dispositivo es sumergido dentro

del agua, las pérdidas disminuyen, debido a que se produce una variación del ángulo crítico (α_c) entre el núcleo y el medio exterior. Cuando el medio exterior es el aire ($n_L=1$), se tiene $\alpha_c=42^\circ$, mientras que si se tiene agua ($n_L=1,33$) se tiene $\alpha_c=63^\circ$. En este último caso, la luz propagada en la zona curvada se confina mejor debido a la variación de 21° del ángulo crítico.



(a)



(b)

Fig. 1. Construcción del sensor basado en pérdidas por curvatura. a) Diagrama del sensor. b) Fotografía del sensor empleado.

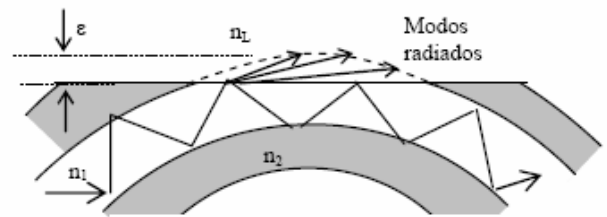


Fig. 2. Región Curvada con pulido de revestimiento.

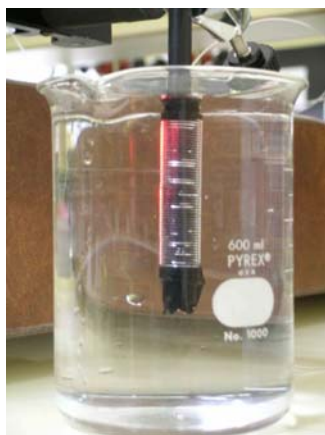
Con la finalidad de realizar la demostración experimental, se diseñó y realizó un sistema electrónico de tratamiento de señal para poder visualizar las medidas experimentales. Sin embargo para cotejar las pérdidas inducidas por la curvatura y el pulido, la señal óptica recibida es detectada con un medidor de potencia ANRITSU.

Como el sensor debe ser inmune a los efectos de la luz ambiental, se incluyó un circuito modulador en la fuente de luz (LED a $\lambda=660$ nm) de 1 KHz. La demodulación en el receptor se realizó con un filtro a la misma frecuencia.

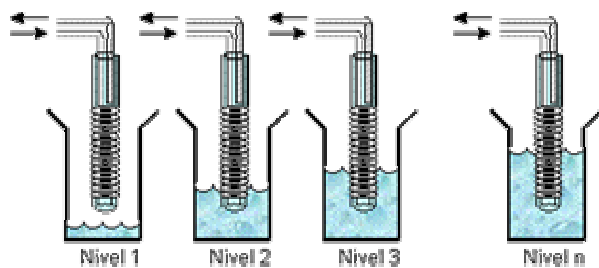
El montaje experimental es mostrado en la Fig. 3. Para llevar a cabo el experimento, primero se ubicó el sensor perpendicularmente a un nivel de agua constante, el cual se llenaba cada 1mm, con el fin de mostrar la linealidad en las pérdidas de la luz recibida por la fibra [8] al ir subiendo el nivel de agua contenido en el recipiente. Fig. 6.

Con el objetivo de obtener datos experimentales de llenado a velocidad constante, se realizó un arreglo experimental para llenar el recipiente de Pirex a una velocidad regulada y conocida de 0.01405 cm/s. Los datos

fueron medidos en pérdidas de luz cada 20 segundos, como se muestra en la Fig. 4 y 5. Los valores de la Fig 4, correspondientes entre 0 y 140 segundos muestra un comportamiento constante en las pérdidas como consecuencia que, el nivel de agua no ha alcanzado el sensor y la parte de la fibra expuesta a pérdidas inducidas por curvatura y pulido. Una vez alcanzado el sensor este muestra una variación en las pérdidas de forma lineal a medida que sube el nivel del líquido, en este caso agua.



(a)



(b)

Fig. 3. Montaje experimental del sensor de velocidad de llenado de líquido
(a) Fotografía del montaje experimental. (b) Procedimiento experimental llevado a cabo para mostrar la velocidad de llenado del recipiente.

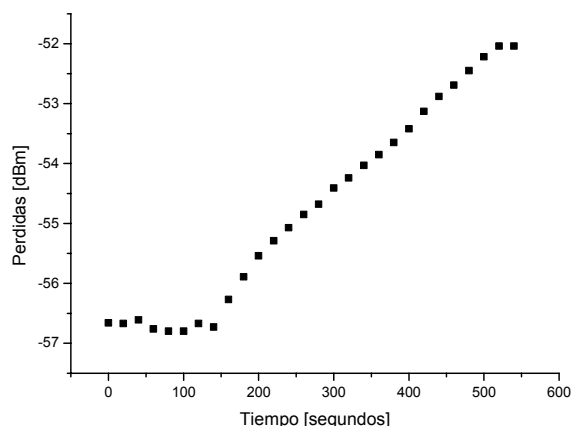


Fig. 4. Pérdidas en la luz recibida en un extremo de la fibra plástica, debidas al llenado constante de un recipiente con agua. La zona que corresponde al intervalo entre 0 y 150 segundos muestra un nivel constante, debido a que el líquido no ha tocado el sensor.

Como se muestra en la Fig. 5 la respuesta del sensor a las pérdidas cada cierto tiempo, presenta una relación lineal, como era de esperar debido a la velocidad constante de llenado del recipiente de pirex. De modo que relacionando las figuras 5 y 6 se obtiene el valor de velocidad a la que se incrementa el nivel del líquido. Dado que los valores de potencia recibida, a variación de nivel constante y nivel estático son efectuados con el mismo equipo y bajo las mismas condiciones experimentales. La relación de potencias o pérdidas de las figuras 5 y 6 es uno.

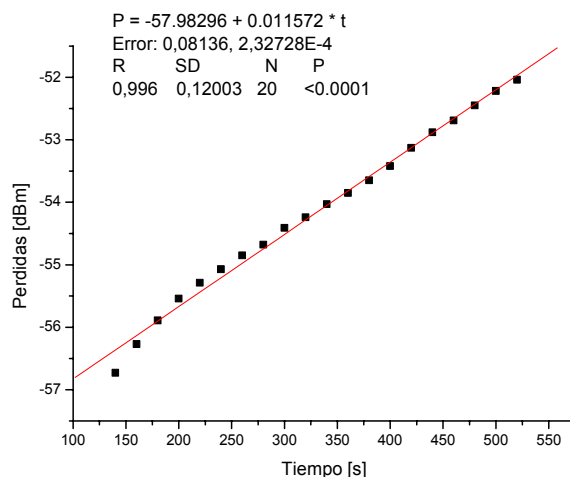


Fig. 5. Selección de la sección correspondiente al sensor y a la fibra expuesta a pérdidas por curvatura y por pulido del revestimiento.

Utilizando los valores obtenidos con el método de regresión lineal para tiempo y altura ($C_1=0.011572$ dBm/s y $C_2=0.07845$ dBm/mm), se encuentra la velocidad de llenado (C_1/C_2) medida con el sensor que, corresponde a 0.014748 cm/s, comparando el valor obtenido con la velocidad establecida al principio del trabajo experimental, se encuentra una muy buena correlación entre los valores de velocidad.

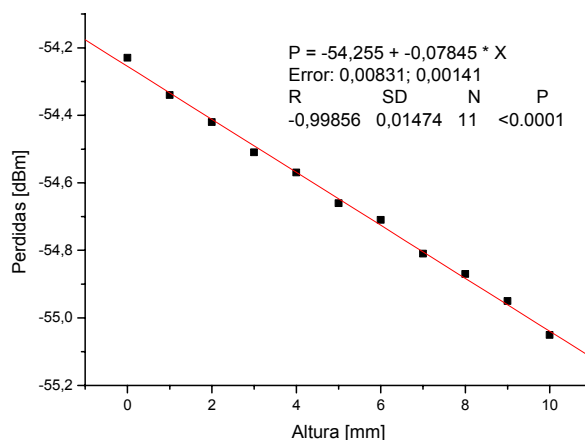


Fig. 6. Pérdidas en la luz recibida al final a un extremo de la fibra debidas al cambio de nivel de agua en un recipiente.

IV. CONCLUSIONES

Se ha realizado un sensor de medida de velocidad de llenado de un líquido, en un recipiente cerrado, basado en pérdidas por curvatura en fibras ópticas plásticas. El diámetro de la fibra caracteriza el paso o resolución de cambio de nivel de líquido, de modo que si se desea mejorar el comportamiento y respuesta del sensor a variaciones mas pequeñas de nivel o, que es lo mismo, velocidades de variación de nivel mas altas, se puede lograr mediante una disminución en dicho diámetro y mas espiras para conseguir una longitud mayor. Las pérdidas inducidas al pulir parte del revestimiento, hacen que, el contacto del medio exterior sea más sensible. Los resultados experimentales presentan una buena correlación con las previsiones teóricas cuando se incorpora el efecto del revestimiento finito de la fibra. Debido a que el sensor está basado en pérdidas inducidas por curvaturas y pulido del revestimiento, dicho sensor no es exclusivo para fibras ópticas de plástico, siendo posible su implementación con fibras de vidrio convencionales, dependiendo del líquido al que se le desee controlar la variación de nivel. El empleo de fibras ópticas de plástico y LED's permite que, esta sea una solución económica, de buen desempeño y adaptable a diferentes tipos de líquidos; dando posibilidad a aplicaciones industriales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean presentar sus agradecimientos al gobierno español porque, este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto TEC2004-05936-C02-02.

REFERENCIAS

- [1] J. M. López-Higuera, "Handbook of optical fiber sensing technology", John Wiley and Sons Ltd., England, 2002.
- [2] A.P Boechat, D. Su, D.R. Hall, J.D.C. Jones, "Bend loss in large core multimode optical fiber beam delivery systems", *Applied optics*, 30,321, 1991.
- [3] M. Lomer, D. Blanco, Joseba Zubía, C. Jauregui, J.M. Lopez-Higuera, "sensor de nivel de líquido multipunto basado en pérdidas de curvatura basadas en FOP", URSI 2005, Gandía, Spain. 2005.
- [4] D. Donlagic and B. Culshaw, "Propagation of the fundamental mode in curved graded index multimode fiber and its application in sensor systems," *J. Lightwave Technology*, 18, 334, 2000
- [5] K. Watanabe, K. Tajima, and Y. Kubota, "Macrobending characteristics of a hetero-core splice fiber optic sensor for displacement and liquid detection," *IEICE Trans. Electron.* E83-C, 314, 2000.
- [6] J. Arrue and J. Zubia, Analysis of the decrease in attenuation achieved by properly bending plastic optical fibres", *IEE Proc. Optoelectronics*, 143, 135, 1996. J. Zubia, G. Cengotitabengoa and J. Arrue, "Passive Device Based on Plastic Optical Fiber to Determine the Index of Refraction of Liquids", *Applied Optics*, 39, N°6, 941-946, 2000.
- [7] K.T.V. Grattan and B.T. Meggit, *Optical Fiber Sensor Technology*, Chapman & Hall, Great Britain, 1995.
- [8] G. Durana, J. Zubía, J. Arrúe y G. Aldabaldetrekú "Dependence of bending losses on cladding thickness in plastic optical fibers", *Appl. Opt.*, Vol. 42, N°6, pp. 997-1002, (2003).